



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

## LABORATORNÍ PŘÍPRAVEK S NAPÁJECÍMI ZDROJI

LABORATORY TOOL WITH POWER SUPPLIES

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Adam Grufík

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Vladimír Levek, Ph.D.

BRNO 2020

# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Mikroelektronika a technologie**

Ústav mikroelektroniky

**Student:** Adam Grufík

**ID:** 186073

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2019/20

**NÁZEV TÉMATU:**

## Laboratorní přípravek s napájecími zdroji

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte a realizujte laboratorní výukovou desku tvořenou několika dostupnými napájecími zdroji na malé napětí. Budou zde zastoupeny: lineární zdroj, spínaný zdroj zvyšující, spínaný zdroj snižující a nábojová pumpa. Vybraným zdrojům bude umožněno variabilní nastavení důležitých parametrů, měření vybraných veličin a také zobrazení průběhů na osciloskopu. Součástí laboratorního přípravku bude programově nastavitelná zátěž, nastavitelný filtr, měření teploty a řízení provozu jednotlivých zdrojů. Tento přípravek může sloužit pro výuku a názornou praktickou ukázkou v oblasti napájecích zdrojů, a také bude umožňovat ověření závislosti výstupních veličin na nastavení obvodových parametrů.

Součástí bakalářské práce bude návrh a realizace vývojového přípravku a bude vytvořen obslužný program pro mikrokontrolér řídící provoz přípravku. Dále bude proveden popis problematiky napájení a popis aspektů vyplývajících z konkrétních návrhů napájení a budou popsány všechny dílčí bloky návrhu. Závěrem bude provedeno měření a otestování přípravku.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 3.2.2020

**Termín odevzdání:** 8.6.2020

**Vedoucí práce:** Ing. Vladimír Levek, Ph.D.

**doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

### UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Cílem této práce je seznámit se s různými druhy běžně používaných napájecích zdrojů, změřit a porovnat jejich vlastnosti a následně navrhnout laboratorní výukové desky s těmito zdroji. Budou zde zastoupeny spínané zdroje, lineární zdroj, a nábojová pumpa. Prostředek může sloužit pro výuku a názornou praktickou ukázkou v oblasti napájecích zdrojů.

## **Klíčová slova**

Napájecí zdroj, lineární zdroj, spínaný zdroj, nábojová pumpa, snižující měnič, zvyšující měnič, mikrokontrolér

## **Abstract**

The aim of this work is to become familiar with different kinds of commonly used power supplies, measure and compare their properties and then design laboratory teaching board with multiple supplies. The designed instrument can be used for educational purposes and as a demonstration in the field of voltage sources.

## **Keywords**

Power supply, linear power supply, switched power supply, charge pump, step-up converter, step-down converter, microcontroller

### **Bibliografická citace:**

GRUFÍK, Adam. *Laboratorní přípravek s napájecími zdroji*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/127797>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky. Vedoucí práce Vladimír Levek.

## **Prohlášení**

„Prohlašuji, že svou semestrální práci na téma Laboratorní přípravek s napájecími zdroji jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrální práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené semestrální práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této semestrální práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **8. června 2020**

.....  
podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu semestrální práce Ing. Vladimírovi Levkovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne: **8. června 2020**

.....  
podpis autora

# Obsah

1.	Úvod.....	11
2.	Teorie použitých technologií.....	12
2.1	Usměrňovače.....	12
2.1.1	Graetzův usměrňovač .....	14
2.2	Filtrace napětí.....	14
2.3	Integrované stabilizátory .....	15
2.4	Spínané zdroje .....	16
2.4.1	Snižující zdroj .....	17
2.4.2	Zvyšující zdroj .....	20
2.4.3	Nábojová pumpa .....	21
2.5	Zobrazení stavu .....	23
2.6	Elektronická zátěž .....	24
2.7	Řídící mikrokontroler.....	24
3.	Návrh laboratorního přípravku.....	26
3.1	Lineární zdroj .....	27
3.2	Snižující zdroj .....	29
3.3	Zvyšující zdroj .....	30
3.4	Nábojová pumpa .....	31
3.5	Elektronicky řízená zátěž .....	32
4.	Podklady pro výrobu plošného spoje, jeho osazení a oživení.....	33
4.1	Lineární zdroj .....	33
4.2	Spínaný snižující zdroj .....	34
4.3	Spínaný zvyšující zdroj .....	35
4.4	Snižující nábojová pumpa .....	38
5.	Závěr .....	39

# Seznam symbolů a zkratk

## Symbols:

U	...	napětí	[Ω]
I	...	proud	[A]
P	...	výkon	[W]
D	...	střída	[-]
$\omega$	...	úhlová rychlost	[rad·s <sup>-1</sup> ]
Q	...	náboj	[C]
t	...	čas	[s]
$\varphi_{zv}$	...	činitel zvlnění	[%]
C	...	kapacita	[F]
L	...	indukčnost	[H]
U	...	napětí	[Ω]



## Seznam obrázků

Obrázek 1 Průběh vstupního a výstupního napětí v zapojení s jednou diodou .....	13
Obrázek 2 Průběh výstupního napětí v zapojení se čtyřmi diodami.....	14
<b>Obrázek 3 Průběh výstupního napětí v zapojení se čtyřmi diodami a filtrem .</b>	<b>15</b>
Obrázek 4 Princip snižujícího zdroje.....	17
<b>Obrázek 5 Průběhy proudu snižujícího zdroje [8] .....</b>	<b>19</b>
Obrázek 6 Princip zvyšujícího zdroje .....	20
<b>Obrázek 7 Průběh proudů ve zvyšujícím měniči .....</b>	<b>21</b>
Obrázek 8 Průběh napětí na výstupu zvyšující nábojové pumpy .....	22
Obrázek 9 Základní funkční schéma nábojové pumpy .....	23
Obrázek 10 Rozložení pinů mikrokontroléru .....	25
Obrázek 11 Navržená deska.....	26
Obrázek 12 Blokový diagram funkce laboratorního přípravku .....	27
<b>Obrázek 13 Blokové schéma programu mikrokontroléru .....</b>	<b>27</b>
Obrázek 14 Blokové schéma LM317 [9].....	28
Obrázek 15 Blokové schéma snižujícího zdroje LM2596 [11] .....	29
Obrázek 16 Blokové schéma zvyšujícího zdroje LM2585 [10] .....	30
Obrázek 17 Zjednodušené blokové schéma LTC3255 [12] .....	31
Obrázek 18 Schéma zapojení elektronické zátěže .....	32
Obrázek 19 Závislost účinnosti lineárního zdroje na výstupním napětí .....	34
Obrázek 20 Závislost účinnosti spínaného snižujícího zdroje na výstupním napětí	35
Obrázek 21 Závislost výstupního napětí na střídě ovládacího signálu .....	35
Obrázek 22 Závislost účinnosti zvyšujícího zdroje na odebíraném výkonu.....	36
Obrázek 23 Zvyšující zdroj.....	37
Obrázek 24 Závislost účinnosti nábojové pumpy na výstupním proudu.....	38
Obrázek 25 Závislost výkonových ztrát nábojové pumpy na výstupním proudu.....	38

# Seznam tabulek

Tabulka 1 Piny znakového displeje .....	23
---	----

# 1. ÚVOD

Napájecí zdroje se vyskytují v prakticky všech elektronických zařízeních. V dnešní době jsou to často napájecí zdroje spínané. Ty najdeme všude tam, kde je potřeba dosáhnout vysoké účinnosti při nízké hmotnosti a malých rozměrech. To jsou například nabíjecí adaptéry pro mobilní telefony a notebooky, počítačové zdroje, ale i DC – DC převodníky a mnoho dalšího. Spínaných zdrojů je mnoho druhů, AC-DC a DC-DC například zvyšující, snižující, invertující, nebo plný most atd. Lineární zdroje mají jednodušší návrh a neruší obvod v oblasti vysokých frekvencí. Mají ale značné výkonové, a tudíž i tepelné ztráty, což je nežádoucí.

Tato práce se bude zabývat pouze DC-DC druhem spínaných zdrojů a zdroji lineárními. První část bude věnována teoretickému rozboru jednotlivých napájecích zdrojů a dalších použitých částí laboratorní desky. Bude vysvětlen princip fungování jednotlivých napěťových zdrojů a jejich případné využití. Další část se bude zabývat konkrétním modelům vybraných obvodů.

## 2. TEORIE POUŽITÝCH TECHNOLOGIÍ

Nejprve je potřeba se seznámit s pojmy používanými při práci se zdroji. Zde je přehled základních elektrických veličin používaných v elektrotechnice.

Elektrický náboj je fyzikální veličina, která vyjadřuje velikost schopnosti působit elektrickou silou. Elektrický náboj je záporný, pokud celkový počet elektronů je větší než celkový počet protonů, kladný v opačném případě a neutrální, pokud počty jsou stejné. Jeho jednotkou je Coulomb a značí se  $Q$ .

Elektrický proud udává, kolik náboje projde určitým průřezem za jednotku času. Jeden ampér odpovídá průtoku náboje o velikosti jeden coulomb za jednotku času. Značí se písmenem  $I$  a jednotkou je ampér.

$$I = \frac{Q}{t} \quad (1)$$

Elektrické napětí je rozdíl dvou elektrických potenciálů a reprezentuje energii vynaloženou na pohyb jednotkového kladného náboje z místa s nižším potenciálem na místo s vyšším potenciálem.

Výsledkem součinu napětí  $U$  a proudu  $I$  je elektrický výkon. Ten se pak může měnit v teplo, mechanickou energii, elektromagnetickou energii a podobně.

$$P = U \cdot I \quad (2)$$

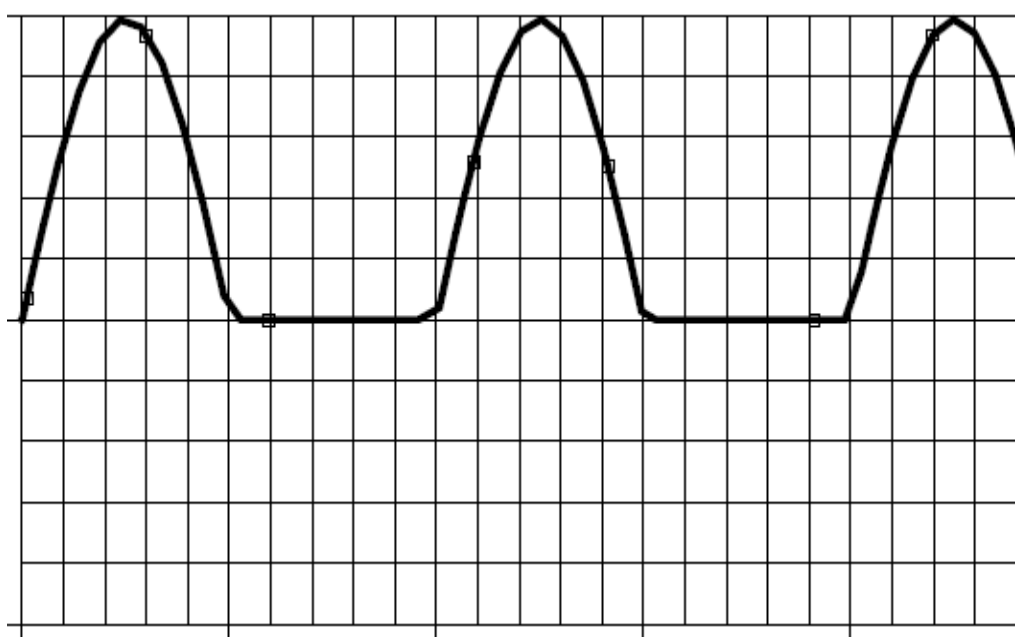
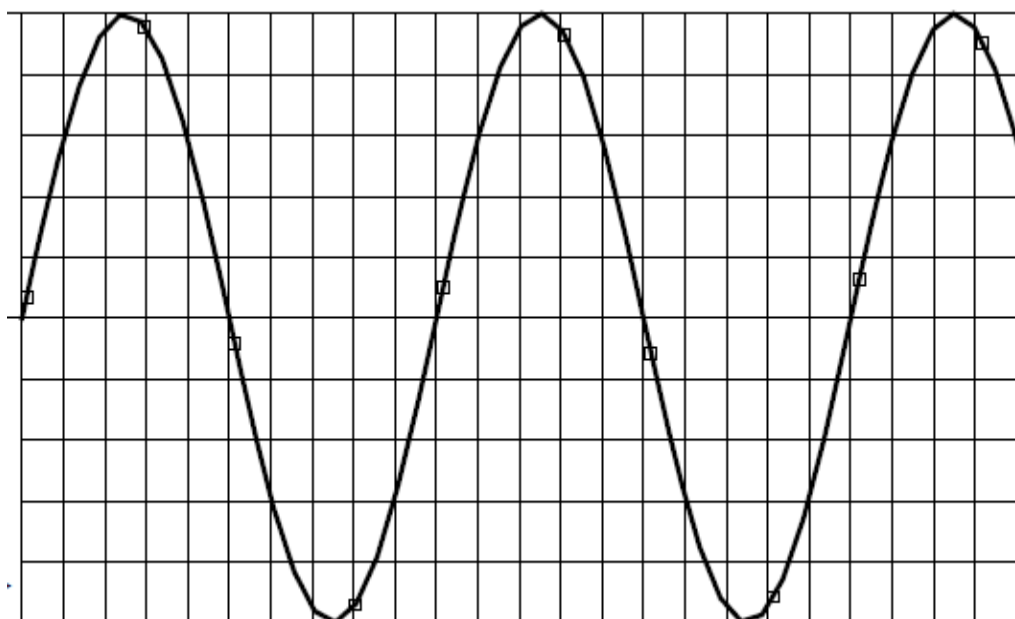
Napájecí zdroje se navrhují kvůli energetickým potřebám elektronických zařízení. Malá zařízení se obvykle napájí stejnosměrným proudem a s neměnným napětím. Z těchto požadavků plynou nároky na dva základní obvody:

- Usměrňovače – obvody, které přeměňují střídavé napětí na napětí stejnosměrné.
- Stabilizátory – Obvody, které udržují stále stejné výstupní napětí, nebo proud při změnách vstupu, nebo změnách odběru zátěže.

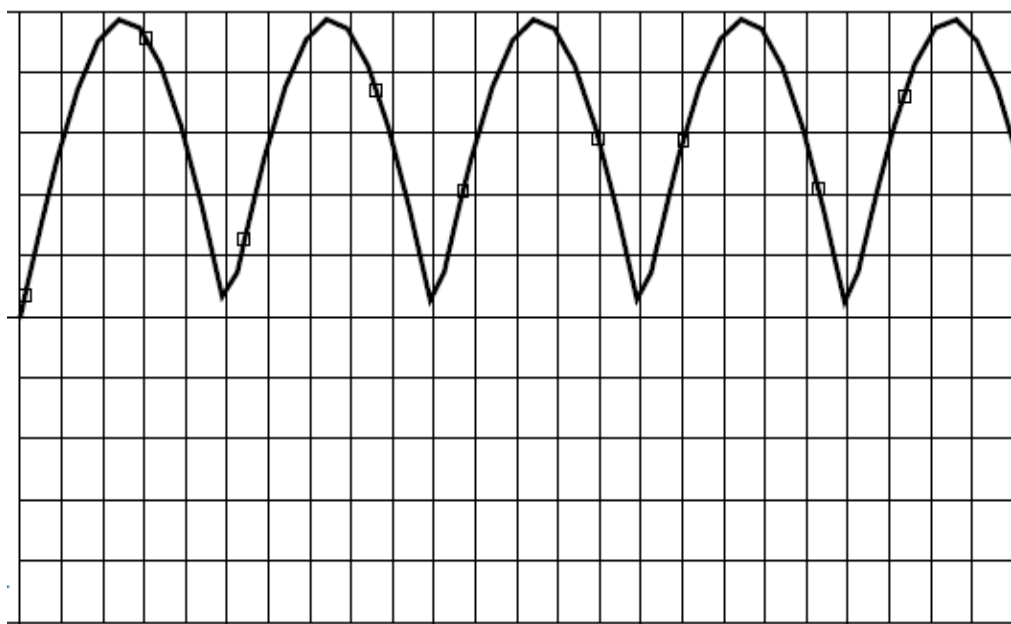
### 2.1 Usměrňovače

Pro usměrnění jednofázového napětí se používají usměrňovače jednocestné, dvoucestné a můstkové. Z praktického hlediska je použití jiného než můstkového usměrňovače nežádoucí, kvůli negativním efektům, které tyto usměrňovače mají. Jednocestný usměrňovač je jednoduchý, ale usměrňuje pouze kladnou půlvlnu sinusového napětí, takže je i po vyhlazení kondenzátorem vysoké zvlnění výstupního napětí, jak je vidět na Obrázek 1.

Dvoucestný usměrňovač ke své funkci vyžaduje transformátor se sekundárním vinutím s vyvedeným středem. Ten se připojí na zem a vzniknou tak dvě napětí vzájemně posunutá o  $180^\circ$ . Diody propouští proud pouze jedním směrem, podle polarit PN přechodu. Na každé diodě pólované v propustném směru je úbytek napětí vlivem difuzního napětí. Proud obvodem prochází pouze tehdy, je-li překročeno prahové napětí diody  $U_{D0}$ . U dnes nejčastěji používaných křemíkových diod je to přibližně 0,6 V.



**Obrázek 1 Průběh vstupního a výstupního napětí v zapojení s jednou diodou**



Obrázek 2 Průběh výstupního napětí v zapojení se čtyřmi diodami

### 2.1.1 Graetzův usměrňovač

V tomto zapojení jsou na každou půlvlnu vstupního signálu dvě diody v sérii, takže na usměrňovači při použití křemíkových diod např. 1N4007 vzniká úbytek podle proudu procházejícím diodou cca  $2 \times 0,6$  V, tedy přibližně 1,2 V. S velkým usměrňovaným proudem dochází k vysokým ztrátám a diody je nutné ochlazovat. Při dvojpulzním usměrňování se využívá jak kladná, tak i záporná půlvlna střídavého proudu, takže nevznikají časové prodlevy mezi výstupními pulzy. Při usměrňování napětí větších než asi 5 V můžeme prahové napětí diod zanedbat (vzniká chyba menší než 10 %).

## 2.2 Filtrace napětí

Usměrněné napětí může vykazovat větší hodnotu zvlnění, než je vyžadována daným elektrickým zařízením. Měřítkem pro posouzení zvlnění je *činitel zvlnění*  $\varphi_{zv}$  definovaný vztahem

$$\varphi_{zv} = \frac{U_{zv}}{U_{ss}} \cdot 100 \quad (3)$$

Činitel zvlnění udává, kolik procent ze získaného stejnosměrného napětí  $U_{ss}$  činí amplituda zbytkového střídavého napětí  $U_{zv}$ . Je-li třeba činitel zvlnění snížit, může se za usměrňovač zařadit vyhlazovací filtr. Většinou se definuje pro první harmonickou složku zvlnění, vyšší harmonické jsou potlačeny ještě lépe (vyhlazovací filtr představuje hornofrekvenční zadrž). [4]

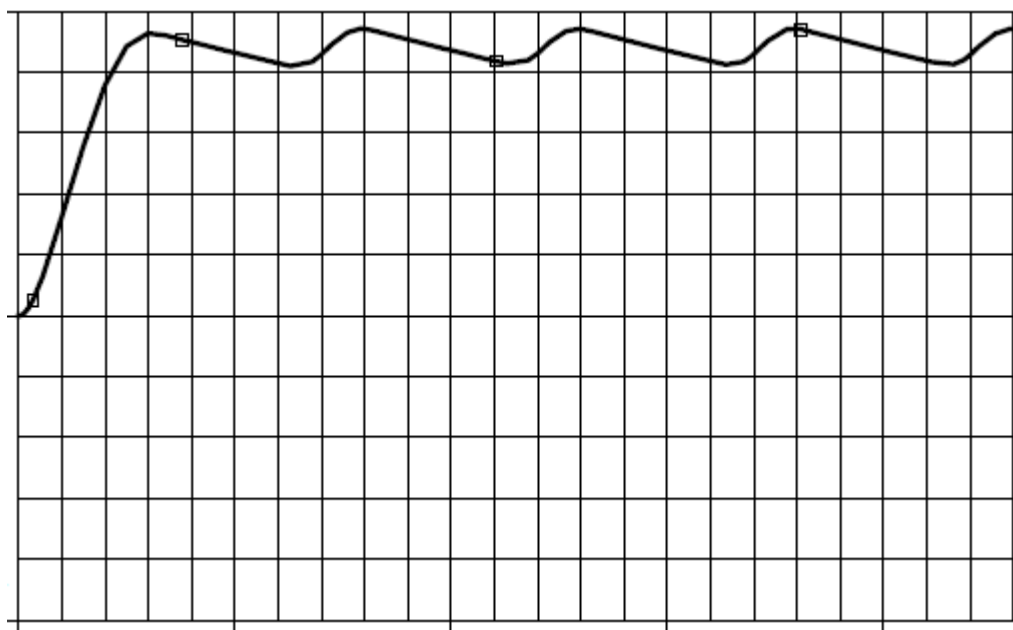
Nejúčinnějším vyhlazovacím filtrem je filtr LC, jehož činitel vyhlazení je (při zanedbání ohmického odporu cívky)

$$\varphi_{zv} \doteq \omega^2 \cdot L \cdot C - 1 \quad (4)$$

kde  $\omega$  je úhlová rychlost,  $L$  indukčnost cívky a  $C$  kapacita kondenzátoru.

V praktickém návrhu je třeba brát v potaz úbytek stejnosměrného napětí na cívce. Ten by měl být co nejmenší. Je také třeba počítat se stejnosměrnou složkou magnetické indukce, způsobenou průchodem proudu. Pro usměrňovače s malým proudovým odběrem většinou stačí levnější a konstrukčně méně náročný RC filtr. Je na něm však vyšší úbytek napětí než u LC filtru. Činitel vyhlazení je

$$\varphi_{ZV} \doteq \omega \cdot R \cdot C \quad (5)$$



Obrázek 3 Průběh výstupního napětí v zapojení se čtyřmi diodami a filtrem

## 2.3 Integrované stabilizátory

Jak z názvu vyplývá, jsou tyto stabilizátory vyrobeny integrací obvodu do plastového nebo kovového pouzdra. Mají velmi nízkou energetickou účinnost. Stabilizátory pro menší výkony zpravidla není potřeba chladit. Pro větší výkony vyžadují chlazení, proto mají z výroby připravenou chladičovou plochu pro montáž na chladič. Fungují totiž jako předřadný odpor, ztrácí se na nich přebytečné napětí a mění se na teplo. Samotný obvod potřebuje pro svou funkci vstupní napětí o jistou hodnotu vyšší, než je napětí výstupní. Toto napětí se nazývá napěťový spád (*dropout voltage*). Například běžný regulátor jako 7805 má výstupní napětí 5 V, ale pro správnou funkci vyžaduje vstupní napětí alespoň 7 V. Jeho napěťový spád je tedy  $7\text{ V} - 5\text{ V} = 2\text{ V}$ . Pokud je vstupní napětí nižší, je potřeba použít převodníků s nízkým vypínacím napětím – *low dropout regulators (LDO)*.

Existuje více druhů integrovaných stabilizátorů, například pro stabilizaci kladného napětí, záporného napětí a s pevným i proměnným výstupem. Mají vestavěné ochrany proti přetížení a přehřátí. Standartně jsou v pouzdrech TO 220, nebo TO 66.

## 2.4 Spínané zdroje

Díky vývoji technologií, snížení cen a dostupnosti polovodičů byly vyvinuty zdroje spínané, které mají oproti klasickým stabilizovaným zdrojům zhruba desetkrát menší hmotnost, třikrát menší objem a větší účinnost (kolem 85 %). Tato účinnost je dosažena spínáním – rychlým odpojováním a připojováním zdroje ke spotřebiči. Jako spínací prvky se používají tranzistory, nebo tyristory. Nízké hmotnosti je dosaženo použitím vysokých frekvencí střídavého napětí dle rovnice:

$$A = \frac{E}{4,44 \cdot f \cdot N \cdot B} \quad (6)$$

Kde  $A$  je plocha transformátoru,  $E$  výkon v kVA,  $f$  frekvence,  $N$  počet závitů a  $B$  hustota magnetického toku. To umožňuje použití menších transformátorů. Filtrační obvody pak také mohou mít malé rozměry. [1]

S využitím vyšších frekvencí vyvstává problém ztrát použitých magnetických obvodů (pro tyto účely byly vyvinuty výkonové ferity) a problém s usměrněním vyrobeného a transformovaného střídavého napětí (používají se buď "rychlé" diody, např. Schottkyho, nebo spínací unipolární tranzistory při synchronním usměrnění). Střídač s usměrňovačem se souhrnně nazývá měnič. [4]

Stabilizátory s pracovním kmitočtem sítě jsou starší. Jejich konstrukci umožnily tyristory a triaky. S těmito zdroji nelze dosáhnout velké přesnosti stabilizace. Jsou těžší a objemnější, ale podstatně levnější. Vyhovují pro méně náročné aplikace, kde nepotřebujeme extrémní stabilitu, přesnost a kde nejsou kladeny požadavky na zvlnění výstupního napětí.

Konstrukci stabilizátorů s vyšším pracovním kmitočtem umožnila výroba rychlých, polovodičových, výkonových, spínacích součástek, feritových jader a malých kondenzátorů s velkou kapacitou. Tyto zdroje jsou menší, mají podstatně lepší a přesnější regulaci výstupního napětí. Jsou ale dražší. Mají podstatně složitější obvodové řešení a součástky, které jsou pro tuto konstrukci přímo navrženy. Výrobci dodávají velmi často řídicí obvody v integrované verzi, což podstatně usnadňuje návrh zdroje. Také dodávají kompletní impulsní zdroje jako jediný integrovaný obvod. K takovéto součástce se připojí minimum externích součástek. Zpravidla stačí připojit cívku a kondenzátor a impulsní zdroj je hotov. Dodávají se na různá napětí a výstupní proudy. [3]

Spínaných zdrojů je velké množství a dělí se například na:

1. Spínané zdroj bez transformátoru:
  - Invertující (BUCK – BOOST).
  - Snižující (STEP – DOWN).

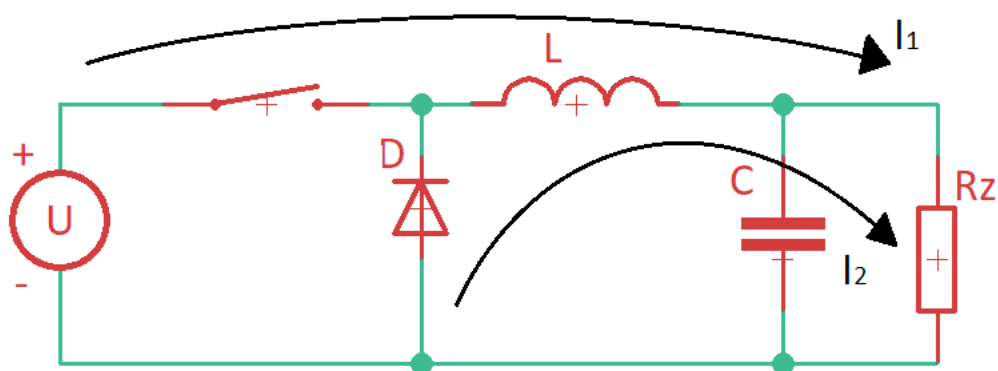


- Zvyšující (STEP – UP).
- 2. Spínané zdroje s transformátorem:
  - Blokující (FLYBACK).
  - Propustný (FORWARD).
- 3. Dvojčinné měniče s transformátorem:
  - Push – Pull.
  - Polomost (HALF – BRIDGE).
  - Plný most (FULL – BRIDGE).

### 2.4.1 Snižující zdroj

Anglicky také *buck converter* nebo *step-down* je druh DC – DC převodníku, který snižuje vstupní napětí a posílá ho na svůj výstup. Patří do skupiny spínaných zdrojů a obvykle obsahuje alespoň dva polovodiče. V moderních zdrojích jsou to dva tranzistory a alespoň jeden úložný prvek jako kondenzátor, cívka, nebo kombinace obojího. Snižující zdroje mohou být vysoce účinné, s účinností až 90 %, díky čemuž jsou velmi vhodné například do počítačových zdrojů, kde z 12 V dělají další potřebná napětí jako 5 V, 3,3 V atd.

Cívka zapojená v obvodu na Obrázek 4 je součástí integrujícího LC článku. Na výstupu je zapojen kondenzátor, který je vlivem proudu  $I_1$  dobíjen. Pokud dojde k sepnutí spínače S, dochází k nárůstu výstupního napětí a to tak, že když je velikost kapacity C a indukčnosti L velká, nabíjení trvá delší dobu a naopak. Pokud dojde k rozepnutí spínače, tak se indukčnost L snaží, aby velikost a směr proudu byly stejné. Během počáteční etapy, kdy došlo k naakumulování energie při sepnutém spínači S, se tato energie mění na proud  $I_2$ , kterým je dobíjen výstupní kondenzátor C. Pro správnou funkčnost tedy musíme obvod doplnit vhodnou součástkou, která nám způsobí uzavření proudového okruhu  $I_2$ . Ve většině případů se zde využívá usměrňovací dioda vhodných parametrů. [7]



Obrázek 4 Princip snižujícího zdroje

Snižující zdroj může pracovat ve více režimech a to sice režimu nepřerušovaném a režimu přerušovaném. Pokud zdroj pracuje v nepřerušovaném režimu, proud cívku L během komutačního cyklu nikdy neklesne na nulu. Když je spínač sepnut, napětí na cívce je:

$$U_L = U_{in} - U_{Rz} \quad (7)$$

Proud cívku přibližně lineárně narůstá a diodou neteče žádný proud, protože je orientována v závěrném směru. Když se spínač rozezne, napětí na cívce bude opačné než na zátěži (pokud zanedbáme úbytek na diodě) a proud cívku začne lineárně klesat. Energie uložená v cívce je rovna:

$$E = \frac{1}{2} L \cdot I_L^2 \quad (8)$$

Takže lze vyvodit, že se energie v cívce  $L$  zvyšuje, když je spínač sepnutý a snižuje se, když je vypnutý. Cívka se používá pro převod energie ze vstupu na výstup měniče. Rychlost změny proudu cívku se dá spočítat ze vzorce:

$$U_L = L \cdot \frac{dI_L}{dt} \quad (9)$$

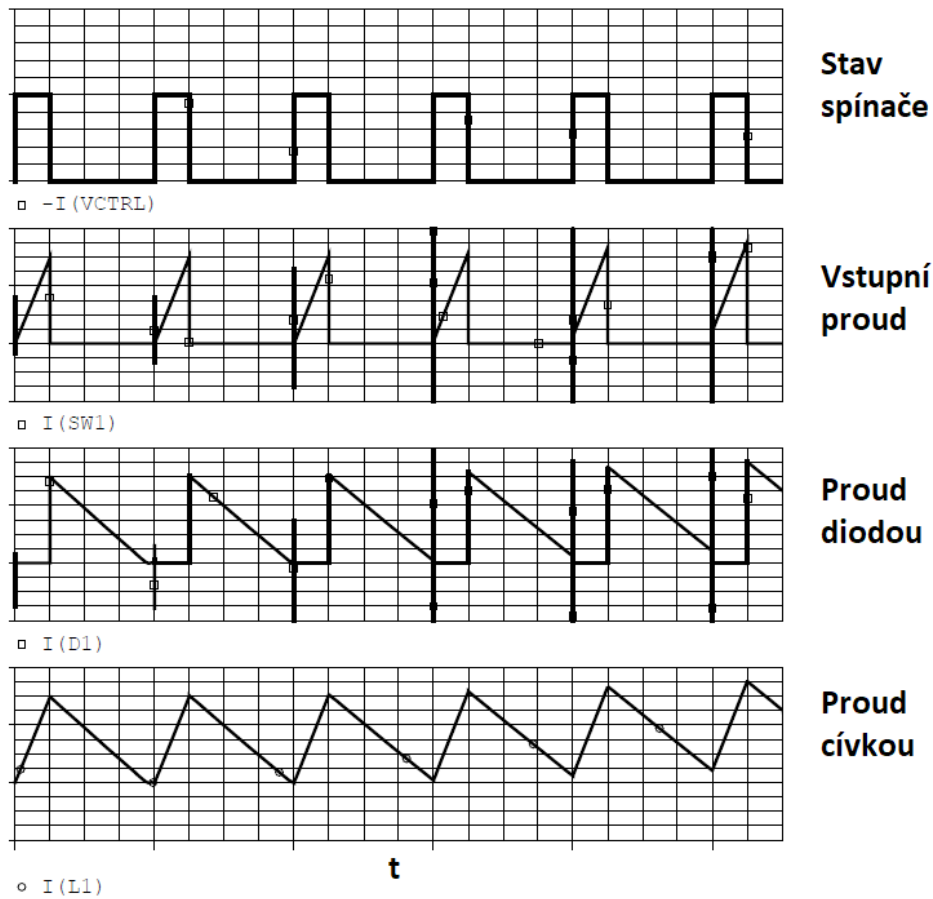
S napětím na cívce rovným rozdílu vstupního a výstupního napětí (7) při nabíjení cívky a  $-V_{Rz}$  při jejím vybíjení. Pro nabíjení tedy platí

$$\Delta I_{L_{on}} = \int_0^{t_{on}} \frac{U_L}{L} dt = \frac{(U_{in} - U_{Rz})}{L} \cdot t_{on}; t_{on} = DT \quad (10)$$

kde  $D$  je skalár nazývaný střída s hodnotou mezi 0 a 1. Pro vybíjení platí vzorec:

$$\Delta I_{L_{on}} = \int_{t_{on}}^{T=t_{on}+t_{off}} \frac{U_L}{L} dt = \frac{-U_{Rz}}{L} \cdot t_{off}; t_{off} = (1 - D)T \quad (11)$$

Za předpokladu, že měnič pracuje v ustáleném stavu, je energie uložená v každém prvku na konci komutačního cyklu  $T$  rovna energii na začátku cyklu. Tudíž je proud  $I_L$  stejný v čase  $t = 0$  a  $t = T$ .



**Obrázek 5 Průběhy proudu snižujícího zdroje [8]**

Jak lze vidět z grafu (**Obrázek 5**), střída určuje poměr sepnutí a vypnutí spínače a lze tedy vyvodit:

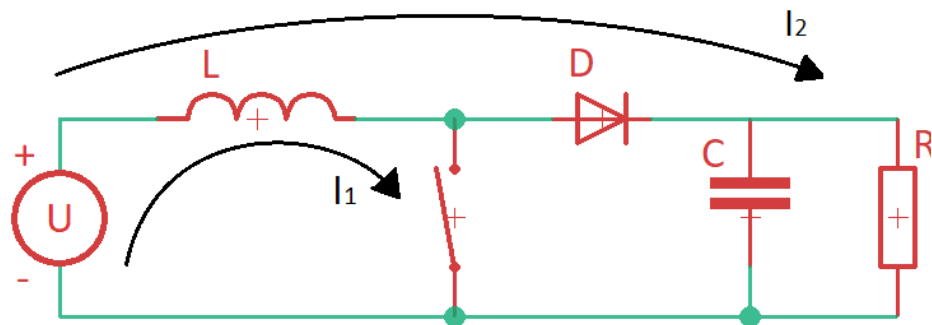
$$D = \frac{U_{RZ}}{U_{in}} \quad (12)$$

Z této rovnice jde vidět, že výstupní napětí měniče je závislé na střídě a vstupním napětí. Střída je poměr mezi dobou sepnutí  $t_{on}$  a periodou  $T$ , takže nemůže být vyšší než 1. Tím pádem výstupní napětí nemůže být vyšší než napětí vstupní. Proto se tento měnič nazývá snižující zdroj.

V určitých případech je požadované množství energie ze zdroje příliš nízké. V tomto případě klesne během části periody proud cívkou na nulu. Tomu se říká přerušovaný režim. Rozdíl oproti režimu nepřerušovanému je v tom, že cívka je na konci komutačního cyklu úplně vybitá. Toto má ovšem vliv na předcházející rovnice. Snížení proudu cívkou na nulu má za následek vybíjení výstupního kondenzátoru v každém cyklu a tedy vyšší ztráty při spínání. Aby se zabránilo těmto ztrátám, používá se pulzně-frekvenční modulace (PFM)

## 2.4.2 Zvyšující zdroj

Anglicky též *boost converter* nebo *step-up*. Tento obvod (Obrázek 6) má za úkol zvyšovat vstupní napětí. Použití najde například u baterií, kde je potřeba vyšší napětí, ale z důvodu prostorového omezení nejde použít více článků v sérii. Měnič má dva stavy, ve kterých se může nalézat – spínač S je rozepnutý nebo sepnutý (je jasné, že reálné zapojení nepoužívají mechanický spínač, ale rychlý polovodičový tranzistor). Pokud je spínač sepnutý, proud  $I_1$  teče ze zdroje  $U$  přes cívku  $L$  a tím pádem je na levém konci cívky kladné napětí. Když se spínač rozezne, polarita cívky se změní a kladné napětí bude vpravo. V obvodu nám tak vzniknou dva zdroje zařazené sériově, které přes diodu  $D$  začnou proudem  $I_2$  nabíjet kondenzátor  $C$  na vyšší napětí, než je napětí zdroje. Toto napětí se pak objeví i na zátěži  $R_z$ .



Obrázek 6 Princip zvyšujícího zdroje

Pokud budeme uvažovat ideální součástky (cívka nebude mít žádný sériový odpor a na diodě nebude žádný úbytek napětí), pak je výstupní napětí na zátěži závislé na době, po kterou je spínač otevřen a zavřen dle rovnice:

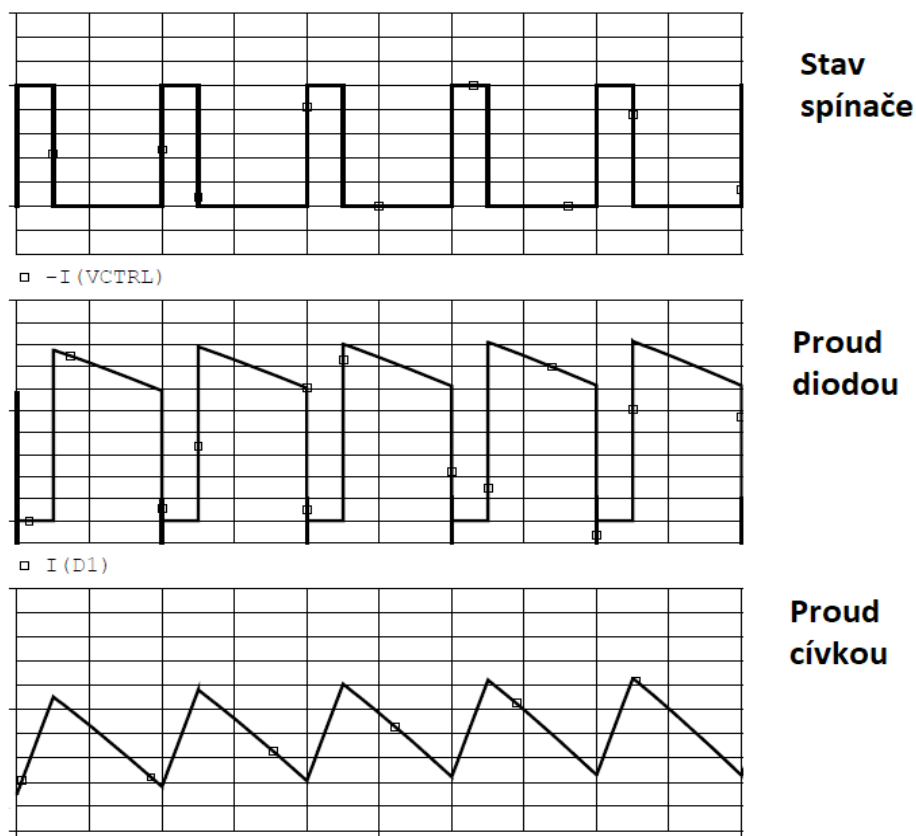
$$\frac{\Delta I_L}{\Delta t} = \frac{U_{in}}{L} \quad (13)$$

Stejně jako snižující zdroj může zvyšující zdroj pracovat v nepřerušovaném a přerušovaném režimu. Pokud pracuje v nepřerušovaném režimu, nesmí proud cívkou během komutačního cyklu klesnout na nulu.

V případě, že frekvence spínání je konstantní (řádově stovky kHz až jednotky MHz), je výstupní napětí závislé na střídě  $D$ . V případě, že střída  $D=0$  je spínač vypnutý a výstupní napětí je stejné jako vstupní. Jak se bude střída zvětšovat, bude se zvětšovat i výstupní napětí, které může teoreticky dosáhnout až nekonečna (ale opravdu jen teoreticky). Vztah pro výstupní napětí je: [4]

$$U_{OUT} = \frac{1}{1-D} \cdot U_{IN} \quad (14)$$

Kde  $D$  je střída a  $U$  vstupní a výstupní napětí. Ze vztahu lze vidět nepřímou úměru mezi výstupním napětím a střídou.



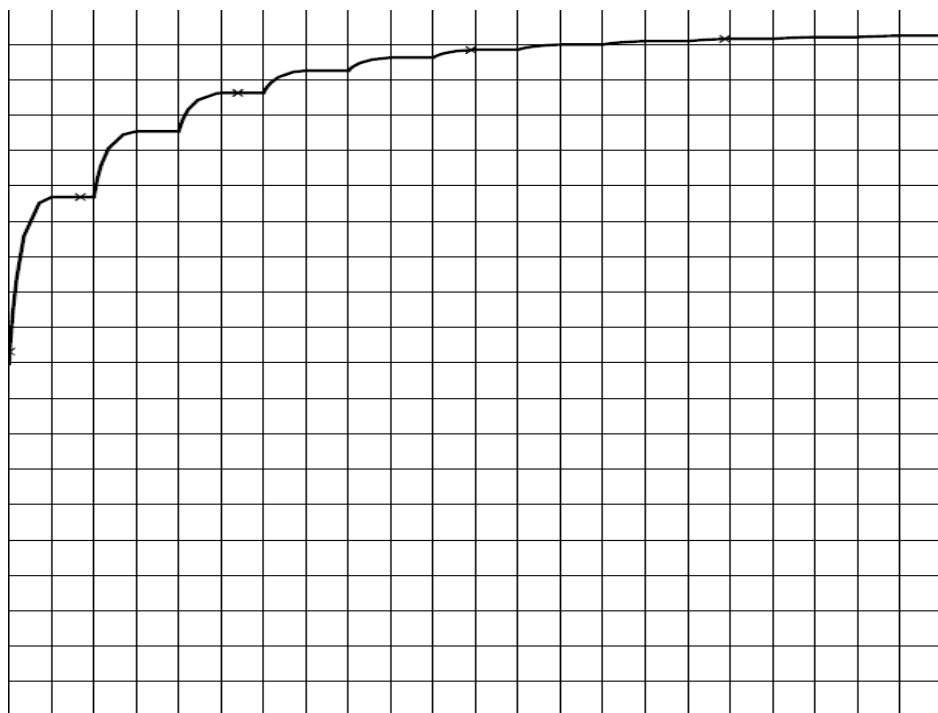
Obrázek 7 Průběh proudů ve zvyšujícím měniči

### 2.4.3 Nábojová pumpa

Nábojová pumpa je druh spínaného regulátoru, který dodává energii pouze střídavým nabíjením a vybíjením kondenzátorů. Existuje více druhů nábojových pump, například násobiče napětí, regulátory spínacího napětí, nebo invertory. Pokud je k dispozici střídavé napětí, jde vytvořit nábojovou pumpu s využitím pouhých pasivních součástek – diod, které se starají o spínání. V případě stejnosměrného napájení je zapotřebí aktivních spínačů, které nejdříve nabijí kondenzátor a následně přepnou výstupy tak, aby na výstupu bylo požadované napětí.

Nízko výkonové zvyšující měniče mohou místo cívky použít nábojovou pumpu. Ta obvykle obsahuje dva nebo více kondenzátorů a spínačů, které jsou použity ke zvýšení

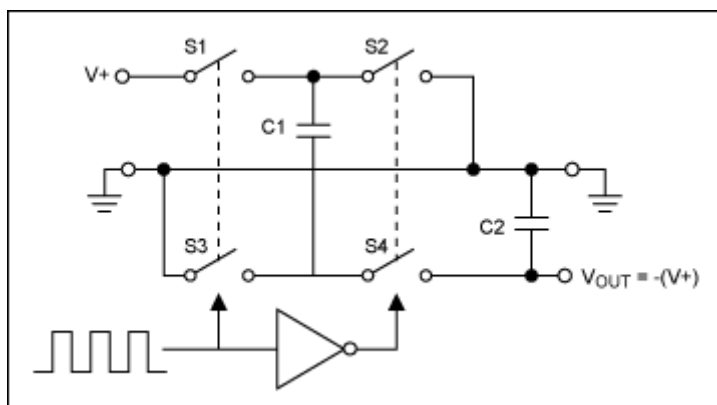
výstupního napětí nad úroveň vstupního napětí. Ze vstupního napětí se nabije kondenzátor a následně se přepínače uspořádají tak, aby se nabil další kondenzátor v řadě. Tento proces se opakuje, dokud není poslední kondenzátor v řadě nabitý. [6]



**Obrázek 8 Průběh napětí na výstupu zvyšující nábojové pumpy**

Externí nebo sekundární obvod řídí spínání typicky rychlostí desítek kilohertzů až megahertzů. Díky vysoké frekvenci není potřeba velká kapacita kondenzátorů, jelikož se v kratším cyklu nemusí uchovat a vypouštět tak veliký náboj.

Použití najdou všude, kde je potřeba zvýšit napětí s vysokou účinností, někdy až 95%, při celkem jednoduchém zapojení. Například v mobilních telefonech, napájených jedním lithiovým článkem s typickým napětím 4,2 V. Mohou vstupní napětí zdvojnásobit, ztrojnásobit, ale i invertovat, nebo snížit na polovinu, či jiný násobek.



### Obrázek 9 Základní funkční schéma nábojové pumpy

Běžný integrovaný obvod využívající princip nábojové pumpy je například ICL7660, jehož zapojení je na Obrázek 9. Tento obvod v sobě ukrývá čtyři spínače a oscilátor, takže můžou spínače S1, S3 a S2, S4 pracovat střídavě. Toto zapojení funguje jako invertor, ale po drobných změnách externích součástek může pracovat jako násobič, nebo i dělič napětí.

Sepnutí páru spínačů S1 a S3 nabije kondenzátor C1 na napětí  $V+$  během prvního cyklu. V druhém cyklu se S1 a S3 rozepnou a pár S2 a S4 se naopak sepne. To způsobí, že kladný pól C1 se připojí na zem a negativní pól  $V_{OUT}$ . C1 je tedy paralelní ke kondenzátoru C2. Pokud je na C2 nižší napětí než na C1, proudí z něj náboj do C2, než je nabit na napětí  $-(V+)$ .

## 2.5 Zobrazení stavu

LCD je zkratka pro „liquid crystal display“, tedy displeje z tekutých krystalů. Znakové LCD jsou v dnešní době často používány u domácích i profesionálních projektů kvůli své jednoduchosti a nízké ceně. Díky standardizovanému rozhraní se dají snadno ovládat pomocí mikrokontrolerů. Používají se k zobrazení stavu zařízení, nebo jako rozhraní při výběru nějaké akce.

Znakové LCD se vyrábí v mnoha provedeních, například: 8x1, 8x2, 10x2, 16x1, 16x2, 16x4, 20x2, 20x4, 24x2, 30x2, 32x2, 40x2 atd. Mají tedy pevně určený počet zobrazovaných znaků. První číslo značí počet znaků na řádek (sloupce), druhé číslo udává počet řádků. V projektu bude použit displej 16x2.

Všechny znakové LCD mají stejnou funkci, zobrazovat znaky, čísla a speciální ASCII znaky. Ovládají se přes 14pinové rozhraní, některé displeje mají o 2 piny navíc kvůli LED podsvícení.

**Tabulka 1 Piny znakového displeje**

Číslo pinu	Název pinu	Funkce
1	GND	Zemní pin, 0 V
2	Vcc	Napájecí pin, pro napájení se používá napětí 5 V
3	$V_0$	Nastavení kontrastu displeje. Nejjednodušší je nastavení použitím potenciometru
4	Register select	Přepíná mezi registrem příkazů (0) a datovým registrem (1)
5	Write / read	Při logické 0 je displej v režimu zápisu, při log. 1 je v režimu čtení

6	Enable	Po nastavení všech datových pinů se nastaví pin do logické 1 a tím se provede daný příkaz. Následně se opět nastaví na 0
7–14	Data	8bitová sběrnice, případně 4bitová sběrnice při použití pinů 11–14
15	A	Anoda podsvícení
16	K	Katoda podsvícení

## 2.6 Elektronická zátěž

Je to zařízení, které dokáže podle požadavků uživatele měnit hodnotu elektrického odporu mezi vstupními svorkami. V nejjednodušší formě se může jednat o proměnný rezistor (potenciometr), nebo odporovou dekádu. Ztráty na rezistoru se dají spočítat jako

$$P = R \cdot I^2 \quad (15)$$

Pro zatížení zdroje je tedy třeba vybrat dostatečně velký odpor s adekvátním jmenovitým výkonem. To je maximální elektrický příkon, který může rezistor trvale spotřebovávat. Potenciometry mají nízký jmenovitý výkon, většinou zlomky wattu, a jsou pro toto použití nevhodné. Velkou překážku představuje nutnost ručního nastavování žádané hodnoty a nutnost měření daného odporu.

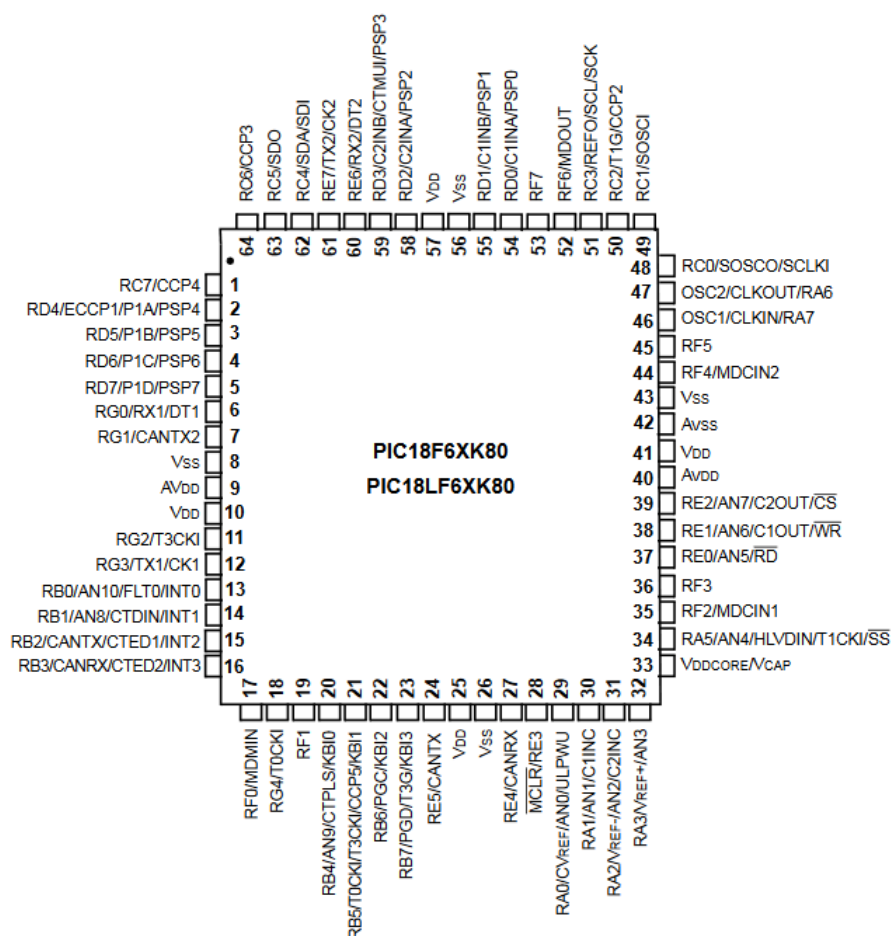
V praxi se používají elektronické zátěže, které se dají ovládat přes rozhraní a jsou stavěny na desítky až stovky wattů.

V praxi se používá mnoho druhů elektronických zátěží, od velmi jednoduchých zapojení až po složitější obvody. V našem případě bude stačit jednodušší zapojení s operačním zesilovačem, pracující v režimu konstantního proudu (constant current).

## 2.7 Řídící mikrokontroler

PIC18F66K80 od firmy Microchip je úsporný, ale výkonný 8bitový mikrokontroler s 28 až 64 piny a 32 nebo 64 kilobitů paměti. Dodává se v pouzdrech SOIC, QFN a dalších. Má velký rozsah napájecího napětí 1.8 V až 5.5 V. Obsahuje 12bitový AD převodník a PWM generátor.





**Obrázek 10 Rozložení pinů mikrokontroléru**

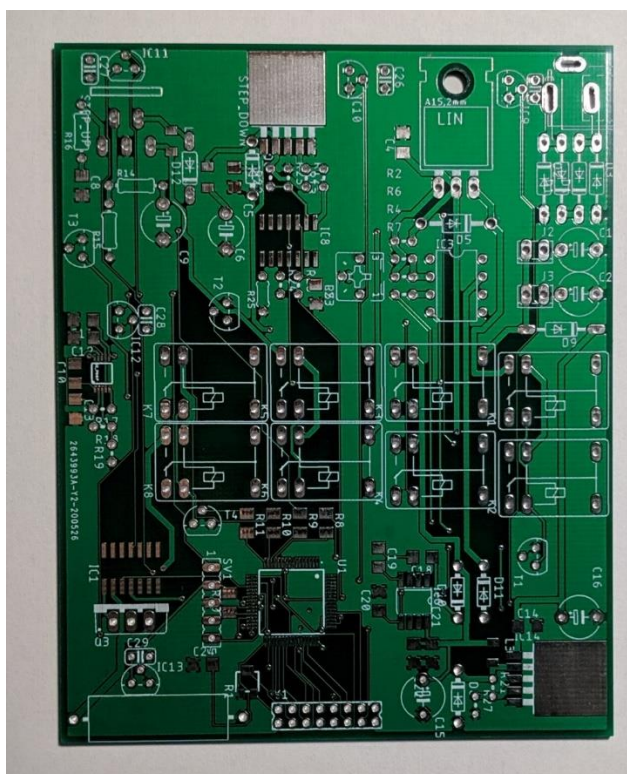
Všechna zařízení z rodiny PIC18F66K80 zahrnují řadu funkcí, které umí výrazně snížit spotřebu během provozu. Také nabízí různé druhy integrovaných i externích oscilátorů, včetně PLL fázového závěsu. Mikrokontrolér také poskytuje až 64 kilobajtů prostoru pro kód na flash paměti, která je schopna až deseti tisíc přepisovacích cyklů.

### 3. NÁVRH LABORATORNÍHO PŘÍPRAVKU

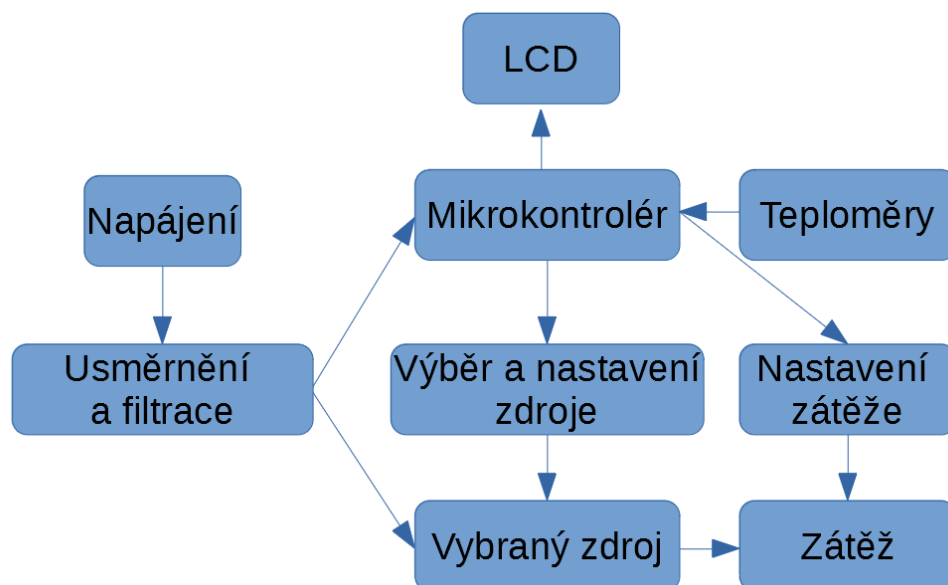
Cílem bakalářské práce je vytvořit laboratorní přípravek se zdroji, který bude ovládán přes jednoduché uživatelské rozhraní a bude na něm možno pozorovat hlavní vlastnosti jednotlivých zdrojů.

Jako napájení pro přípravek slouží střídavý adaptér. Ten byl zvolen, aby bylo možno dále pozorovat změny průběhu napětí při usměrňování. Je tvořen pouze transformátorem, převádějícím síťových 230 V na nižší střídavé napětí. Uvnitř přípravku se nachází dvoucestný usměrňovač – Graetzův diodový můstek, který usměrní napájecí napětí. Na jeho výstupu budou připojitelné kondenzátory pro odfiltrování zvlnění usměrněného napětí. Po filtraci obvod pokračuje elektronicky odpojitelnými zdroji a následně do nastavitelné elektronické zátěže. Celý přípravek je ovládán pomocí mikrokontroleru a výběr jednotlivých zdrojů je zobrazován na znakovém displeji. Použity jsou lineární zdroj LM317, snižující zdroj LM2596, zvyšující zdroj LM2585 a snižující nábojová pumpa LTC3255.

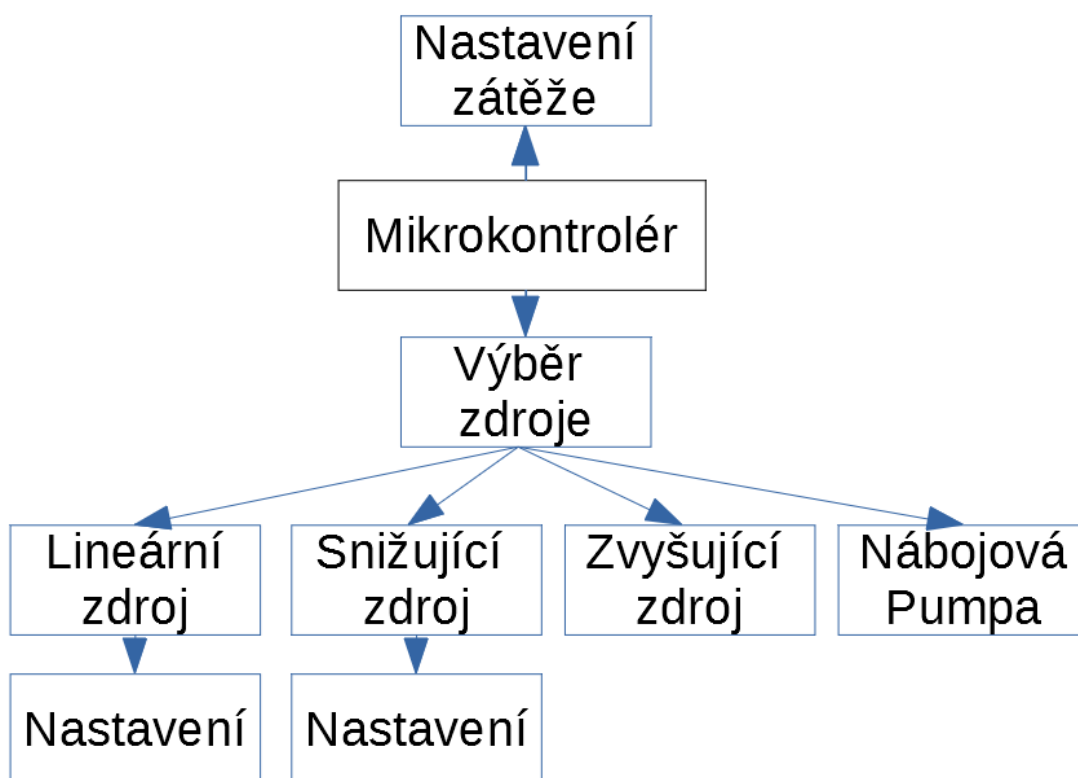
Na všech důležitých místech zapojení budou měřicí body pro osciloskop. Jednotlivé zdroje jsou odděleny pomocí nízkonapěťových relé, aby jejich součástky neovlivňovaly ostatní zdroje, které jsou připojeny paralelně. K měřeným zdrojům bylo třeba přidat ještě další zdroje, které budou napájet mikrokontroler, displej a operační zesilovače. Zapojení viz. přílohy 1–6.



Obrázek 11 Navržená deska



Obrázek 12 Blokový diagram funkce laboratorního přípravku



Obrázek 13 Blokové schéma programu mikrokontroléru

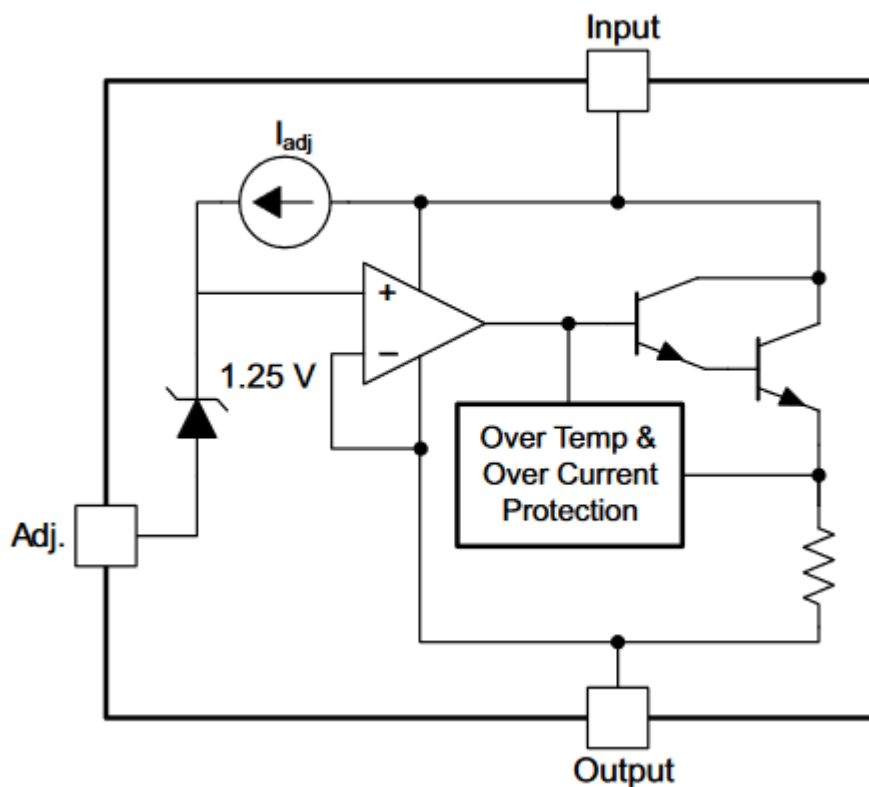
### 3.1 Lineární zdroj

LM317, původně od National Semiconductor, je nastavitelný napěťový regulátor s třemi vývody a kladným výstupním napětím od 1,25 V do 37 V, který je schopný dodat

až 1,5 A proudu. Ke své funkci vyžaduje pouze dva rezistory pro nastavení výstupního napětí. Dá se také zapojit jako zdroj konstantního proudu. Disponuje velmi dobrou regulací vedení 0,01 % a zátěžovou regulací 0,1 %. Obsahuje proudový omezovač a ochranu proti přetížení. Ta je aktivní i když je nastavovací pin odpojen.

Pokud nahradíme jeden rezistor potenciometrem, můžeme změnou jeho odporu regulovat výstupní napětí. Jelikož se jedná o lineární zdroj, rozdíl vstupního a výstupního napětí se musí ztratit na něm. Pokud je tedy na vstupu 20 V, na výstupu chceme 5 V a protékající proud je 1 A, bude úbytek na zdroji 15 V a ztrátový výkon 15 W.

V tomto projektu bude potenciometr nahrazen „digitálním potenciometrem“ složeným z operačního zesilovače, který bude ovládán PWM signálem z mikrokontroleru. Takto bude možno ovládat výstupní napětí bez použití mechanických součástek.



Obrázek 14 Blokové schéma LM317 [9]

## 3.2 Snižující zdroj

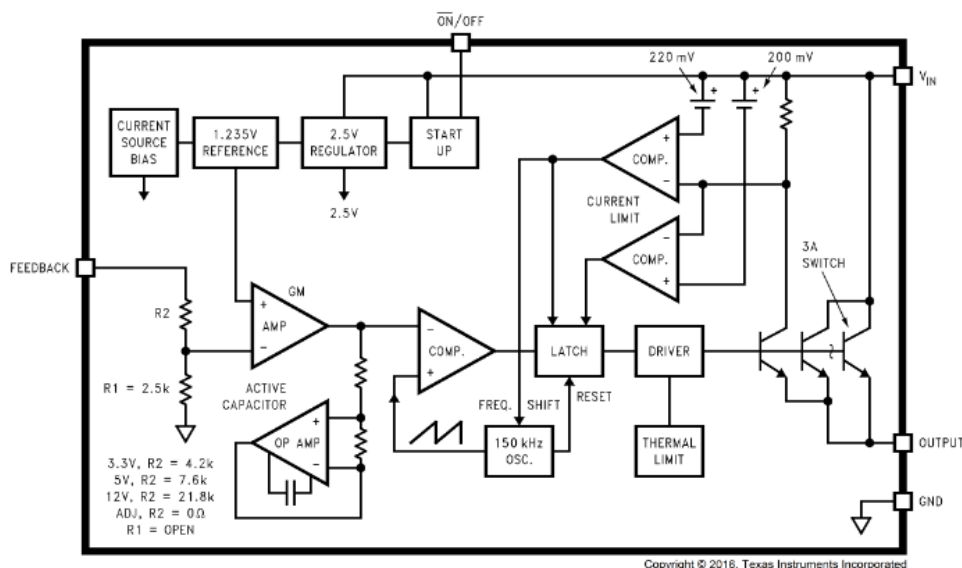
LM2596 je integrovaný obvod vhodný pro jednoduchý návrh snižujícího regulátoru. Je schopen dodat až 3 A při dobré výstupní regulaci. Je k dostání ve verzi s pevným napětím (3,3 V, 5 V, 12 V) a také v nastavitelné verzi, která bude použita a v této práci. Vstupní napětí může být až 40 V. Tyto regulátory jsou jednoduché na použití a vyžadují pouze minimum externích součástek. Obsahují vnitřní frekvenční kompenzaci a oscilátor.

LM2596 pracuje na vysoké frekvenci 150 kHz, tudíž lze použít filtrační součástky menších rozměrů než v případě měničů s nižší frekvencí. Dodává se ve standardním TO-220 pouzdře a také v SMD provedení TO-263. Z důležitých vlastností lze ještě zmínit toleranci výstupního napětí při zátěži  $\pm 4\%$  a  $\pm 15\%$  frekvenci oscilátoru.

Nastavení výstupního napětí probíhá pomocí změny odporu  $R_{13}$  nebo  $R_{12}$  ve vztahu

$$U_{OUT} = 1.23 \cdot \left(1 + \frac{R_{13}}{R_{12}}\right) \quad (16)$$

V tomto případě tedy bude výstupní napětí 4,92 V. Odpor  $R_{13}$  je nahrazen proměnným odporem. Zbytek hodnot je převzatých z datového listu výrobce.



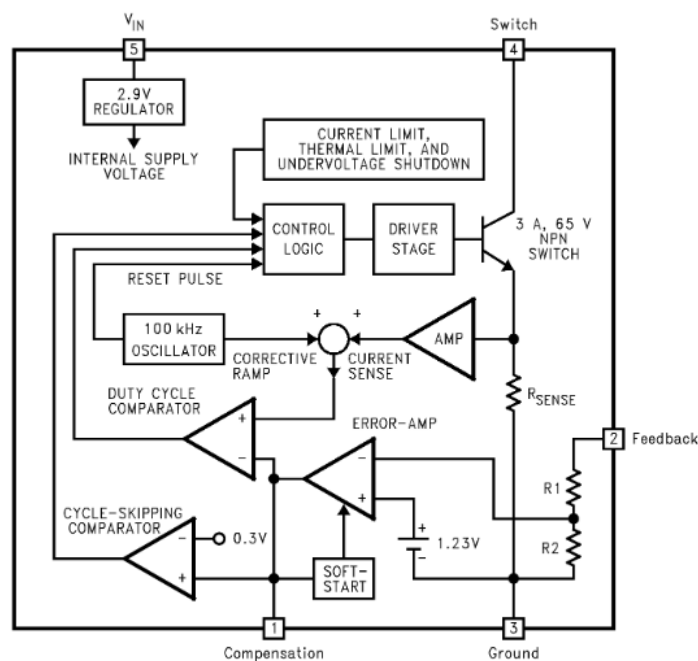
Obrázek 15 Blokové schéma snižujícího zdroje LM2596 [11]

### 3.3 Zvyšující zdroj

Série regulátorů LM2585 jsou monolitické integrované obvody, speciálně navržené pro použití ve *flyback*, *step-up (boost)*, a *forward* měničích. Toto zařízení je dostupné ve 4 provedeních, každé s odlišným výstupním napětím: 3.3 V, 5 V, 12 V, a nastavitelným napětím. Protože vyžadují pouze minimální počet externích komponent, jsou tyto regulátory výhodné z hlediska nákladů a jednoduchosti používání. Výkonový spínač je 3A NPN zařízení, které může vydržet až 65 V. Na ochranu výkonového spínače jsou použity proudové obvody, obvody omezující teplotu, a blokovací obvod v případě podpětí. Tento integrovaný obvod obsahuje pevný interní oscilátor s frekvencí 100 kHz, který dovoluje použití malých cívek. Mezi další funkce patří mód měkkého startu, který má redukovat proudové špičky při startu, ovládání proudového režimu pro zlepšené potlačení přechodových napětí na vstupu a výstupní zátěži a proudový omezovač pracující cyklus po cyklu. Pro napájecí systém je tolerance výstupního napětí  $\pm 4\%$ , v rozmezí specifikovaných vstupních napětí a stavu výstupní zátěže.

Výstupní napětí je nastaveno podílem odporů  $R_{14}$  a  $R_{15}$

$$U_{OUT} = 1.23 \cdot (1 + \frac{R_{14}}{R_{15}}) \quad (17)$$



**Obrázek 16 Blokové schéma zvyšujícího zdroje LM2585 [10]**

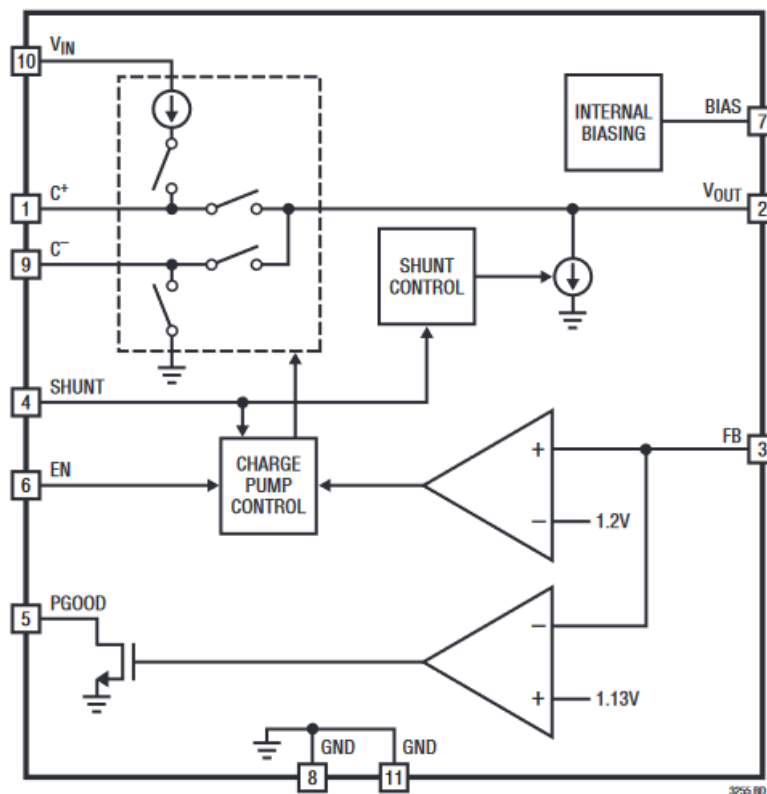
### 3.4 Nábojová pumpa

LTC3255 je spínaný snižující převodník, poskytující regulovatelný výstup od 2,4 V do 12,5 V při vstupním napětí 4 V až 48 V. Výstupní proud je však maximálně 50 mA. Používá DC/DC převodník založený na funkci spínaného kondenzátoru.

Výstupní napětí je nastaveno na pinu FB pomocí odporového děliče mezi výstupem a zemí. Požadované napětí je výsledkem následující rovnice pro  $R_A$  a  $R_B$

$$\frac{R_A}{R_B} = \frac{U_{OUT}}{1,2V} - 1 \quad (18)$$

kdy se  $R_B$  zvolí v rozmezí 20 k $\Omega$  a 2 M $\Omega$  a vyřeší se pro  $R_A$ .



Obrázek 17 Zjednodušené blokové schéma LTC3255 [12]

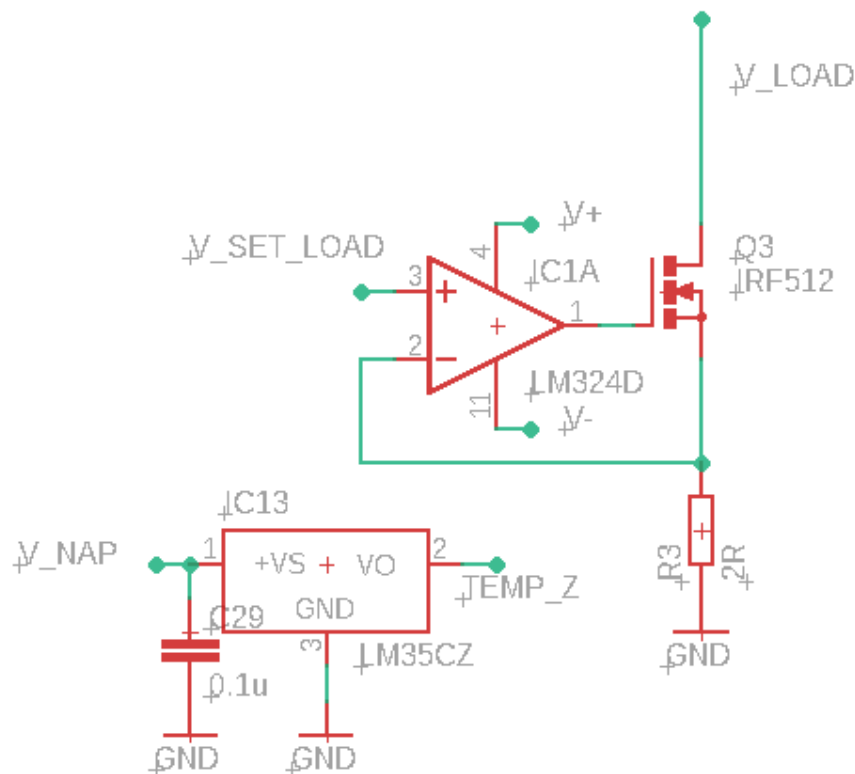
### 3.5 Elektronicky řízená zátěž

Za účelem testování napájecích zdrojů bylo třeba navrhnout jednoduchou zátěž, která půjde ovládat přes mikrokontroler.

Na neinvertující vstup operačního zesilovače je přivedeno napětí, které se operační zesilovač ze své podstaty bude snažit vytvořit i na invertujícím vstupu. Ten je připojen na výkonový rezistor, který je následně uzemněn. Pokud tedy přivedeme na neinvertující vstup napětí 4 V z mikrokontroleru, bude toto napětí i na rezistoru a bude jím dle Ohmova zákona procházet proud  $I = 2 \text{ A}$ , jenž je podílem napětí ku odporu.

$$I = \frac{U}{R} \quad (19)$$

Ze vzorce ( 2 ) je zřejmé, že výkon odebíraný ze zdroje by byl 8 W.



Obrázek 18 Schéma zapojení elektronické zátěže



## 4. PODKLADY PRO VÝROBU PLOŠNÉHO SPOJE, JEHO OSAZENÍ A OŽIVENÍ

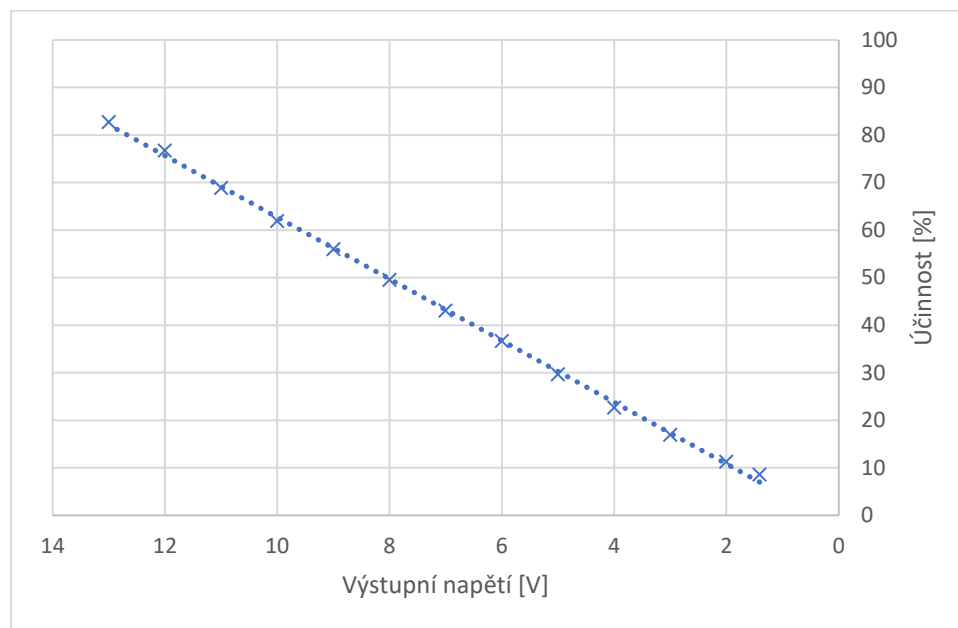
Předloha pro výrobu plošného spoje byla navržena v programu Eagle 9.6.0. Samotná deska je dvouvrstvá z materiálu FR-4. Kromě zadaných zdrojů bylo potřeba navrhnout ještě napájení pro mikrokontrolér, operační zesilovače a další součástky. Součástky byly zvoleny buď podle doporučení výrobce integrovaného obvodu, nebo vypočítány dle aktuálních potřeb. Kondenzátory je dobré zvolit s dostatečnou napěťovou rezervou a nízkým sériovým odporem. Program byl psán v jazyce C ve vývojovém prostředí MPLab IDE v8.91. Měření bylo provedeno pomocí multimetru Uni-T UT139C s přesností 0.5 % +2 a osciloskopem Hantek 6022BE s přesností 3%

### 4.1 Lineární zdroj

Lineární zdroj LM317 byl testován se zátěží zhruba 5  $\Omega$ . Zdroj byl schopný dodat až 1,7 A při výstupním napětí 13 V. Vstupní napětí bylo 15 V. Z grafu (Obrázek 19) jde vidět poměrně vysoká účinnost při takovémto zatížení, která ale při snižujícím výstupním napětím začala rychle klesat. To je dáno vysokými ztrátami na samotném integrovaném obvodu. Účinnost klesá lineárně se snižující se výstupním napětím. Při testování bylo potřeba regulátor po každém měření na chvíli vypnout, protože kvůli vysokým ztrátám regulátor aktivoval tepelnou ochranu. Výstupní napětí nešlo nastavit výše než zmíněných 13 V, zbylé 2 V jsou napětí potřebné pro funkci samotného regulátoru.

**Tabulka 2 Naměřené a vypočtené hodnoty lineárního zdroje**

Vstupní napětí [V]	Výstupní napětí [V]	Proud zdroje [mA]	Proud zátěží [mA]	Výkon zdroje [W]	Příkon zátěže [W]	Účinnost [%]
15	13	1780	1700	26,7	22,1	83
15	12	1720	1650	25,8	19,8	77
15	11	1650	1550	24,8	17,1	69
15	10	1560	1450	23,4	14,5	62
15	9	1500	1400	22,5	12,6	56
15	8	1400	1300	21,0	10,4	49
15	7	1300	1200	19,5	8,4	43
15	6	1200	1100	18,0	6,6	37
15	5	1100	980	16,5	4,9	30
15	4	1000	850	15,0	3,4	23
15	3	850	720	12,8	2,2	17
15	2	710	600	10,7	1,2	11
15	1,4	600	550	9,0	0,8	9



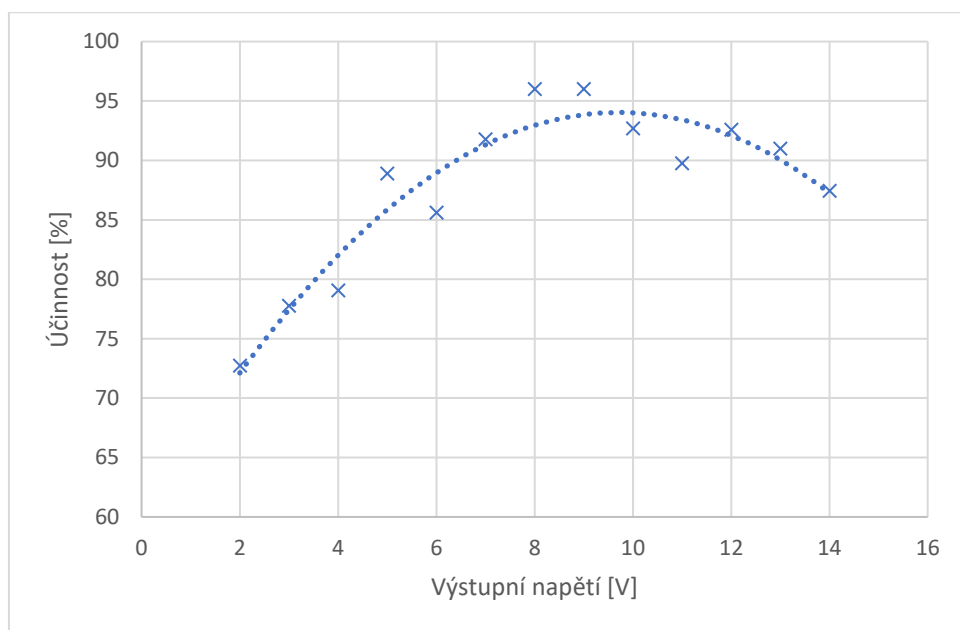
**Obrázek 19 Závislost účinnosti lineárního zdroje na výstupním napětí**

## 4.2 Spínaný snižující zdroj

Snižující zdroj LM 2596 byl testován se stejnou  $5\Omega$  zátěží jako lineární pro jednoduché porovnání těchto dvou zdrojů. Zdroj byl schopný do zátěže dodat 1,78 A při velmi dobré účinnosti 87 %. Jak lze vyčíst z grafu (Obrázek 20), tato účinnost nijak výrazně neklesala ani při nastavení nižšího výstupního napětí, většinu času se držela nad 80 %. Výstupní napětí šlo nastavit až ke 14 V. Teplota čipu byla maximálně  $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

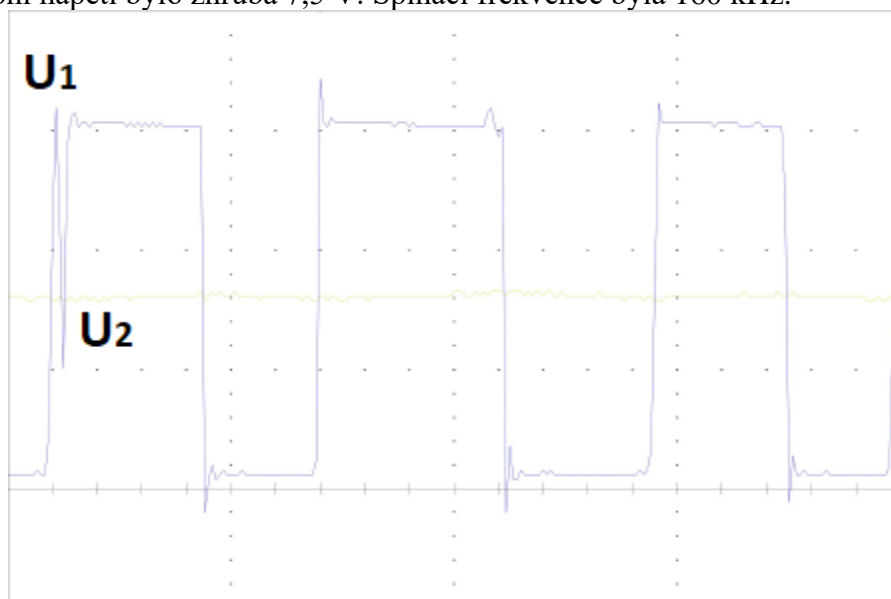
**Tabulka 3 Naměřené a vypočtené hodnoty spínaného snižujícího zdroje**

Vstupní napětí [V]	Výstupní napětí [V]	Proud zdroje [mA]	Proud zátěží [mA]	výkon zdroje [W]	výkon zátěže [W]	Účinnost [%]
15	2	110	600	1,7	1,2	73
15	3	180	700	2,7	2,1	78
15	4	280	830	4,2	3,3	79
15	5	360	960	5,4	4,8	89
15	6	500	1070	7,5	6,4	86
15	7	600	1180	9,0	8,3	92
15	8	700	1260	10,5	10,1	96
15	9	850	1360	12,8	12,2	96
15	10	1050	1460	15,8	14,6	93
15	11	1250	1530	18,8	16,8	90
15	12	1400	1620	21,0	19,4	93
15	13	1600	1680	24,0	21,8	91
15	14	1900	1780	28,5	24,9	87



**Obrázek 20 Závislost účinnosti spínaného snižujícího zdroje na výstupním napětí**

Na Obrázek 21 můžeme sledovat výstup z osciloskopu připojeného na vstup cívky ( $U_1$ ) a výstup z cívky ( $U_2$ ). Amplituda obdélníkového signálu byla 15 V, střída 50 %, takže výstupní napětí bylo zhruba 7,5 V. Spínací frekvence byla 160 kHz.



**Obrázek 21 Závislost výstupního napětí na střídě ovládacího signálu**

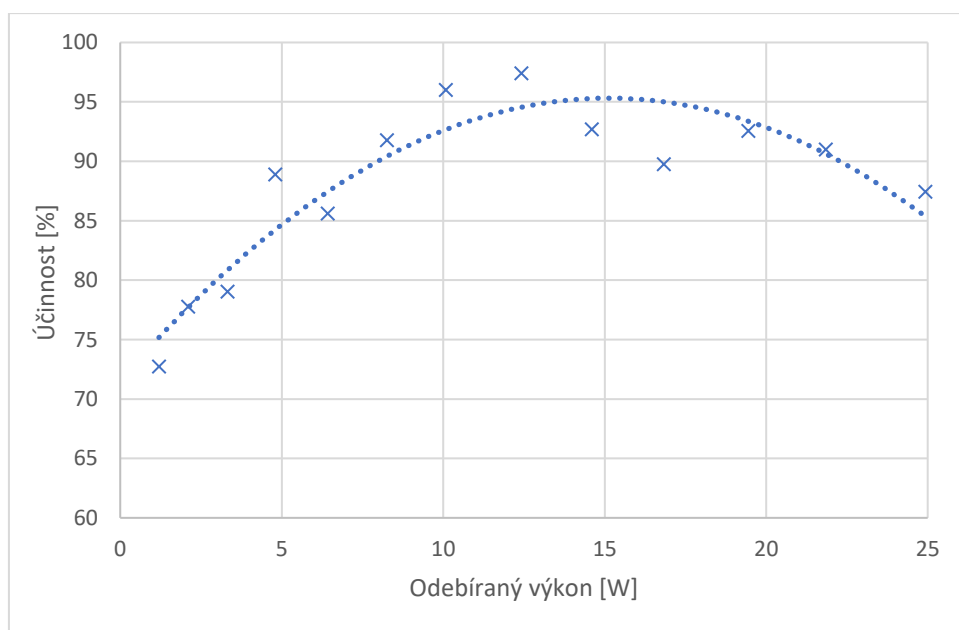
### 4.3 Spínaný zvyšující zdroj

Spínaný zvyšující zdroj je nastaven na výstupní napětí 24 V. Proud byl nastavován pomocí proměnné zátěže. Z grafu na Obrázek 22 lze vyčíst, že zvyšující zdroj má velmi

dobrou účinnost již při nízkém odebíraném výkonu. Díky vysoké účinnosti se zdroj zahřál pouze na 60 °C.

**Tabulka 4 Naměřené a vypočtené hodnoty spínaného snižujícího zdroje**

Vstupní napětí [V]	Výstupní napětí [V]	Proud zdroje [mA]	Proud zátěží [mA]	Výkon zdroje [W]	Příkon zátěže [W]	Účinnost [%]
15	24,1	111	100	2,8	2,5	89,8
15	24,1	222	200	5,6	5,0	90,0
15	24,1	334	300	8,2	7,4	89,8
15	24,1	447	400	11,1	9,9	89,5
15	24,1	560	500	13,8	12,3	89,3
15	24,1	674	600	16,6	14,8	89,0
15	24,1	789	700	19,4	17,2	88,7
15	24,1	907	800	22,3	19,7	88,2
15	24,1	1023	900	25,1	22,1	88,0
15	24,1	1143	1000	28,1	24,6	87,5



**Obrázek 22 Závislost účinnosti zvyšujícího zdroje na odebíraném výkonu**

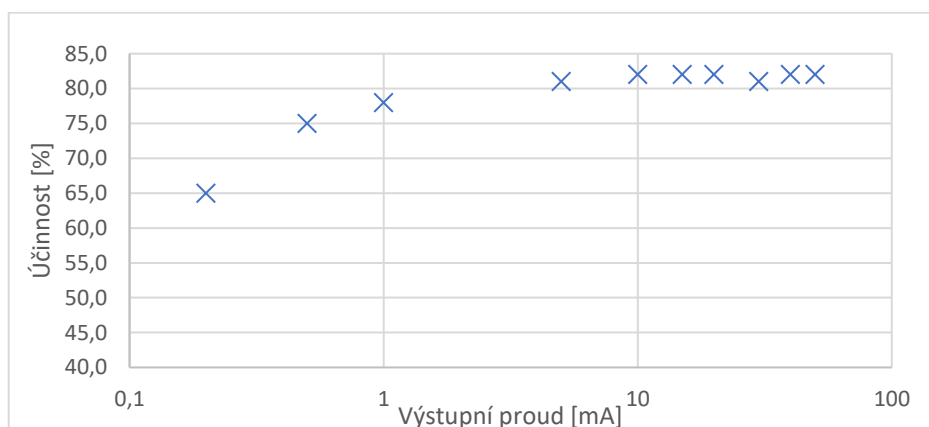
Na Obrázek 23Obrázek 21 můžeme sledovat výstup z osciloskopu připojeného na výstup z cívky. Amplituda obdélníkového signálu byla 15 V, střída 50 %, takže výstupní napětí bylo zhruba 7,5 V. Spínací frekvence byla 160 kHz. Frekvence spínání byla změřena 119 kHz, střída 38 %.



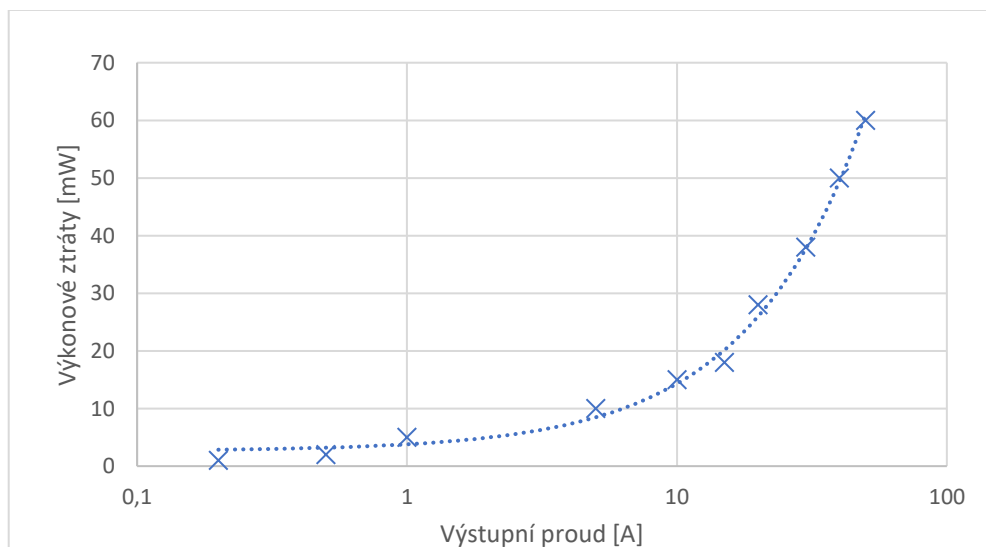
Obrázek 23 Zvyšující zdroj

## 4.4 Snižující nábojová pumpa

Výstupní napětí snižující pumpy bylo nastaveno na 5 V, jelikož se jedná o napětí běžně používané v řadě dalších obvodů. Podle rovnice ( 18 ) byl zvolen odpor rezistoru  $R_{18}$  20 k $\Omega$  a  $R_{19}$  64 k $\Omega$ . Tato hodnota není v odporové řadě E24, byla tedy vytvořena dvojicí sériově zapojených odporů s hodnotami 62 k $\Omega$  a 2 k $\Omega$ . Na Obrázek 24 můžeme vidět závislost účinnosti nábojové pumpy na výstupním proudu. Maximální proud dle katalogového listu je 50 mA, po překročení se obvod začne zahřívat a přestává fungovat dle očekávání.



**Obrázek 24** Závislost účinnosti nábojové pumpy na výstupním proudu



**Obrázek 25** Závislost výkonových ztrát nábojové pumpy na výstupním proudu

## 5. ZÁVĚR

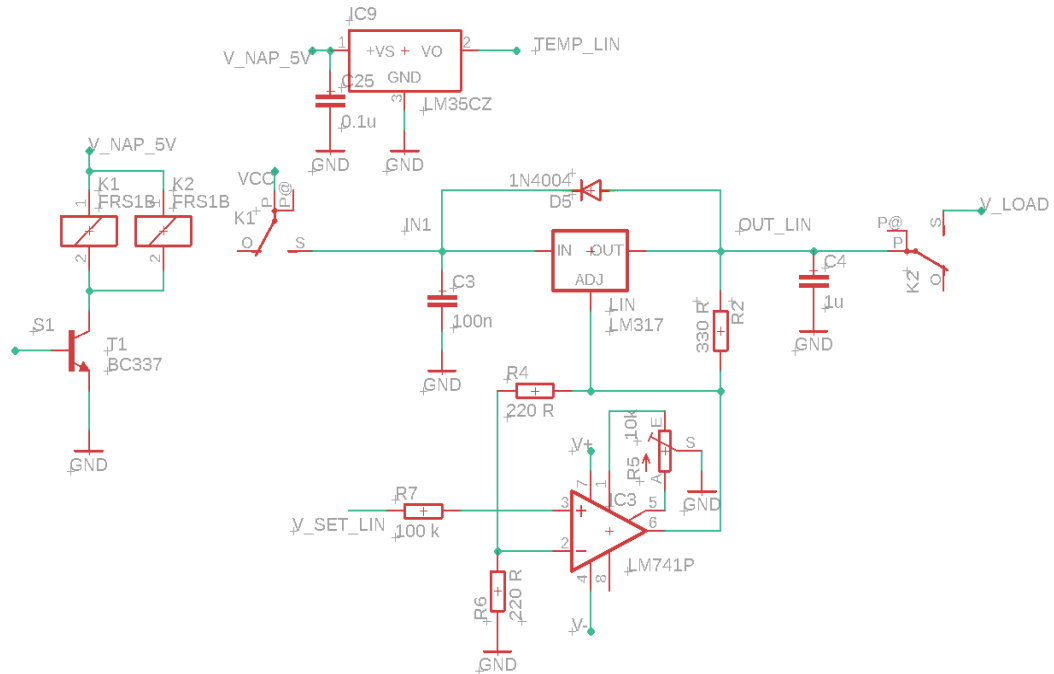
Cílem této bakalářské práce bylo seznámení se s často používanými druhy napájecích zdrojů a jejich vlastnostmi. Byly popsány klady a zápory jednotlivých lineárních a spínaných zdrojů a vysvětlena jejich základní funkce. Velkou část práce zabralo i programování mikrokontroléru PIC, jehož kód obsahuje zhruba 800 řádků. Další část této práce se zaměřila popis konkrétních vybraných DC/DC měničů, jejich vlastností a parametry. Jelikož měly všechny zdroje být napájeny z jednoho napětí bylo třeba vybrat měniče s vysokým vstupním napětím a dobrou dostupností na trhu. Následovalo vytvoření návrhu desky a její výroba, osazení a nahrání kódu do mikrokontroléru. Při návrhu bylo třeba myslet na tepelnou ochranu jednotlivých zdrojů i zátěže. Následné měření jednotlivých zdrojů dokázalo, že účinnost lineárního měniče je při vyšších rozdílech vstupního a výstupního napětí velice špatná a nelze ho tedy doporučit nikam, kde je omezená možnost chlazení. Zato ho lze doporučit na méně náročné aplikace, kde je hlavním parametrem cena. Spínaný snižující zdroj si naopak vedl velmi dobře především v oblasti účinnosti, kde dosahoval až na 95% účinnosti. Další spínané zdroje také předvedly vysokou účinnost a nízké ztráty. Deska byla navržena s ohledem na nízké rozměry.

# Literatura

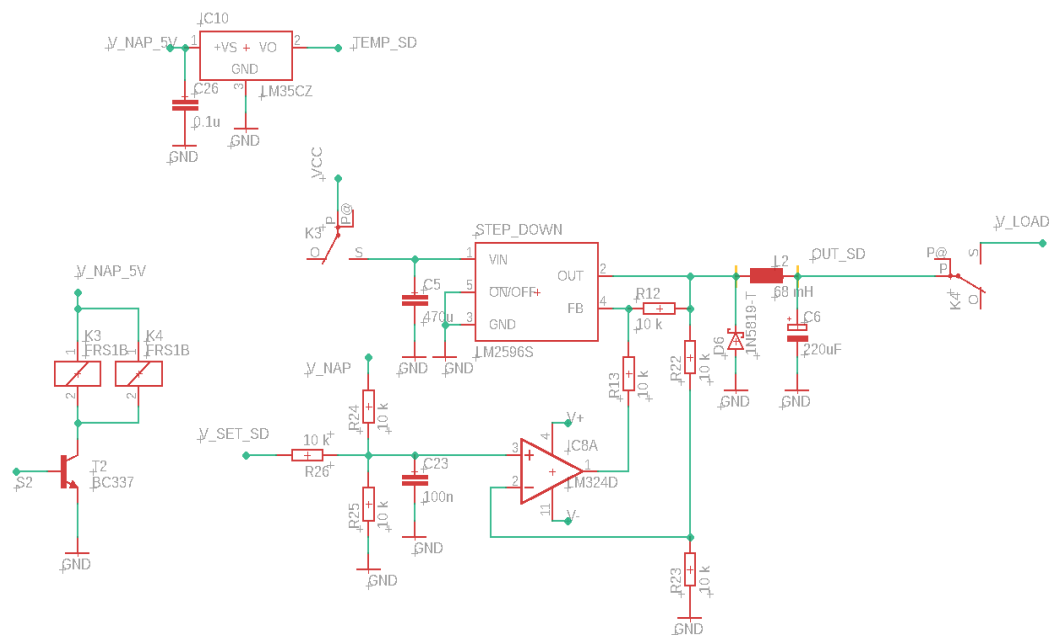
- [1] *Elektronika: učebnice : základní studijní materiál pro střední školy*. 2., aktualiz. a rozš. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-143-8.
- [2] MALINA, Václav. *Poznáváme elektroniku*. 2. vyd. České Budějovice: Kopp, 2007. ISBN 978-80-7232-324-1.
- [3] ING. BABČANÍK, Jan. Spínané zdroje. In: *HW.cz* [online]. 2007 [cit. 2018-11-25]. Dostupné z: [http://www.bernkopf.cz/skola/predmety/elektronika/materialy/prezentace/zdroj\\_s\\_pinany\\_babcanik.pdf](http://www.bernkopf.cz/skola/predmety/elektronika/materialy/prezentace/zdroj_s_pinany_babcanik.pdf)
- [4] DC-DC měniče. In: *Uart* [online]. Vlastimil Slinták, 2013 [cit. 2018-12-13]. Dostupné z: <https://uart.cz/952/dc-dc-menice/>
- [5] NOBILIS, J. Teorie elektronických obvodů VIII. (Napájecí zdroje). Skriptum. Pardubice: Školní nakladatelství a vydavatelství SPŠE Pardubice, 2000, 110s.
- [6] WINDER, Steve. *Power supplies for LED driving*. Second edition. Cambridge, MA: Newnes, [2017]. ISBN 978-0-08-100925-3.
- [7] SKOUPÝ, Petr. *Vzorové moduly DC/DC měničů*. Brno, 2010. Bakalářská práce. VUT Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [8] Step Down Buck Regulator / Converter. In: *Electronics notes* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: [https://www.electronics-notes.com/articles/analogue\\_circuits/power-supply-electronics/switching-step-down-buck-regulator-dc-dc-converter.php](https://www.electronics-notes.com/articles/analogue_circuits/power-supply-electronics/switching-step-down-buck-regulator-dc-dc-converter.php)
- [9] Texas Instruments. *Katalogový list obvodu LM317* [online]. [cit. 2020-02-01]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/slvs044y/slvs044y.pdf?HQS=slvs044-aaj&ts=1591526912847>
- [10] Texas Instruments. *Katalogový list obvodu LM2585* [online]. [cit. 2020-02-01]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symmlink/lm2585.pdf?ts=1591543701278>
- [11] Texas Instruments. *Katalogový list obvodu LM2596* [online]. [cit. 2020-02-01]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symmlink/lm2596.pdf?ts=1591588474339>
- [12] Linear Technology. *Katalogový list obvodu LTC3255* [online]. [cit. 2020-02-01]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/3255f.pdf>



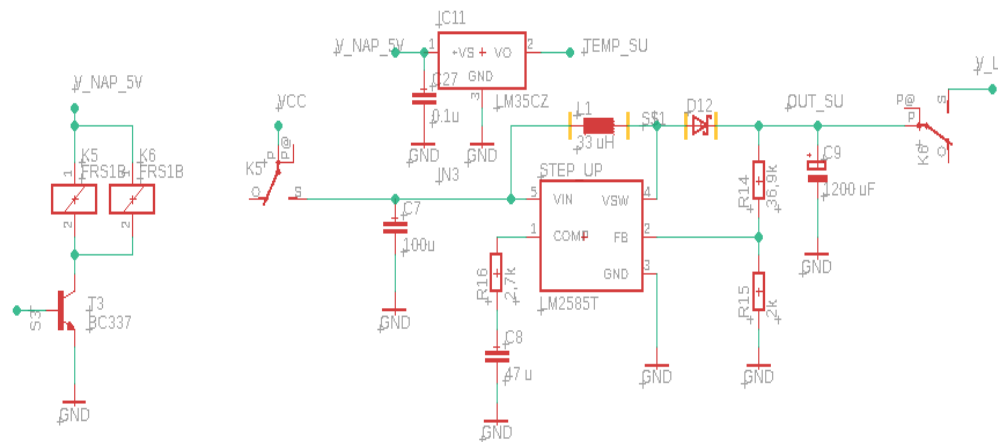
## Příloha 1 - Schéma zapojení LM317



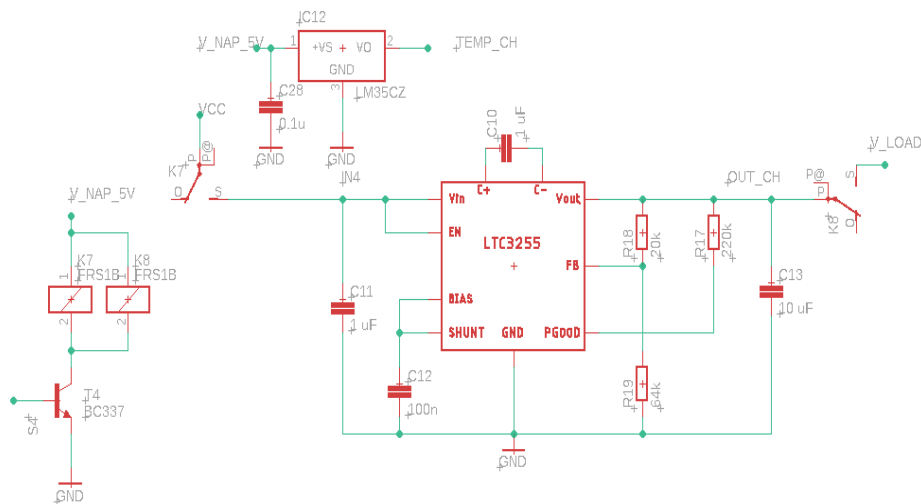
## Příloha 2 - Schéma zapojení LM2596



## Příloha 3 - Schéma zapojení LM2585



## Příloha 4 - Schéma zapojení LTC3255



## Příloha 5 - Schéma zapojení podpůrných napájecích obvodů



